

东南大学电工电子实验中心

实 验 报 告

课程名称： 模拟电子电路实验

第八次实验

实验名称： 波形产生电路设计实验

院（系）： 电气工程学院 专 业： 电气工程及其自动化

姓 名： 王皓冬 学 号： 16022627

实 验 室： 401 实验组别：

同组人员： 实验时间： 2024 年 5 月 21 日

评定成绩： 审阅教师：

一、实验目的

- (1) 了解运放在非正弦波产生电路方面的各种应用；
- (2) 掌握矩形波产生电路的基本结构和工作原理；
- (3) 掌握波形产生电路的输出幅度、周期等测量方式；
- (4) 掌握非正弦波产生电路的设计调试方法。

二、实验原理

1. 基本概念

在工程应用中，经常用到各种不同类型的信号波形，从波形特征可以分为两大类，即正弦波和非正弦波，其中非正弦波常用的有方波、矩形波、三角波、锯齿波等，如图 2-7-1 所示。

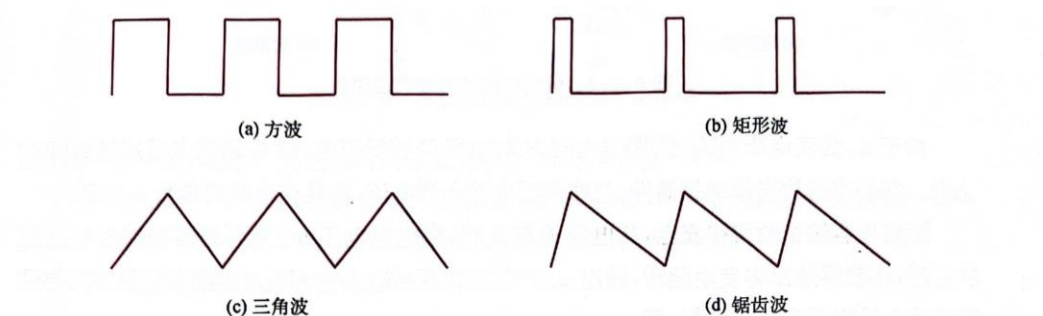


图 2-7-1 几种常用的非正弦波

方波：如图 2-7-1 (a) 所示，指波形具有高电平和低电平两个值，一般所说的方波是指波形的高、低电平为正负幅值相同的波形，否则需要说明其高、低电平的取值，或者说明有多大的直流偏移量。方波的高电平与低电平之差为信号的峰峰值，高电平时间与低电平时间之和为信号的周期。定义高电平时间与信号周期之比为“占空比”，方波的占空比为 50%。

矩形波：如图 2-7-1 (b) 所示，矩形波与方波相比基本类似，区别是矩形波的占空比不等于 50%，即方波是矩形波的特例。

三角波：如图 2-7-1 (c) 所示，信号幅度随着时间周期线性上升与线性下降，上升与下降的斜率绝对值相同，信号的最高点到最低点之间的差值为三角波的峰峰值，一般所说的三角波信号的最高点电压和最低点电压值是正负对称的，否则需要说明最高点和最低点的电压值，或者说明有多大的直流偏移量。

锯齿波：如图 2-7-1 (d) 所示，锯齿波与三角波基本类似，区别是锯齿波的线性上升与线性下降的斜率绝对值不同，所以三角波是锯齿波的一个特例。

2. 方波产生电路

图 2-7-2 (a) 所示为运放构成的方波产生电路，其工作原理为：

当接通电源时，电容电压为零，运放工作在非线性区，其输出端电压为 $+U_Z$ 或 $-U_Z$ 。

假设 $u_o = +U_Z$ ，则运放同相输入端电压 u_+ 的数值为 U_{TH} ，

$$u_+ = +U_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U_{TH}$$

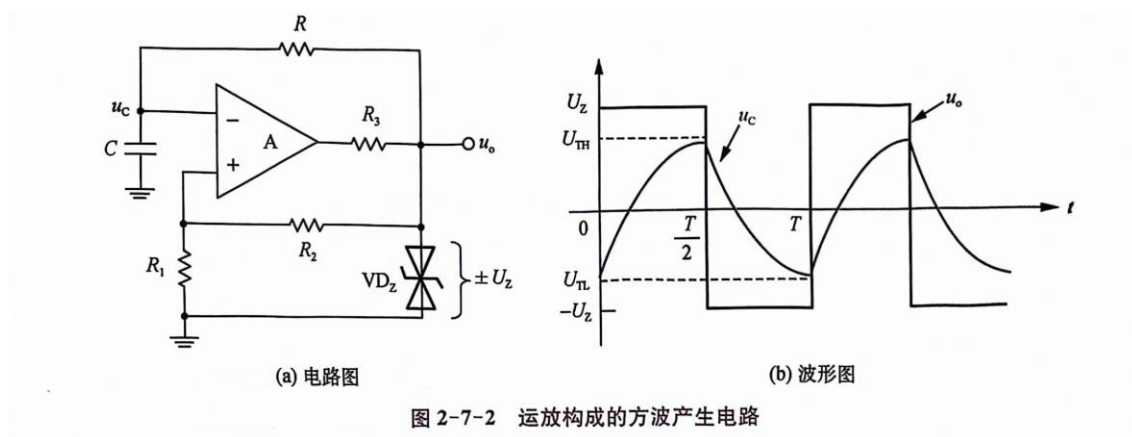


图 2-7-2 运放构成的方波产生电路

由于 u_o 为正电 $+U_Z$ ，将通过电阻 R 对电容 C 进行充电，使 C 两端电压按指数规律上升。如果将运放当作理想器件，忽略其反向输入端电流，则其充电时间常数 $\tau_1 = RC$ 。

随着电容按指数规律充电，其电压逐渐升高，当电容电压 u_C 升高到同相端参考电压 U_{TH} 时，比较器输出将发生翻转，输出 u_o 产生负跳变，使 $u_o = -U_Z$ 。而输出的跳变也导致同相输入端电压产生负跳变，即

$$u_+ = -U_Z \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U_{TL}$$

在 u_o 跳变瞬间，由于电容 C 两端电压不能突变， u_C 将保持原有数值，且大于 U_{TL} ，使输出端能稳定在 $-U_Z$ 上。此时，电容 C 通过 R 放电并在 $-U_Z$ 的作用下反向充电， u_C 按指数规律下降，时间常数 $\tau_2 = \tau_1 = RC$ 。 u_C 下降到同相端参考电压 U_{TL} 时，比较器又一次发生翻转，回到 $u_o = +U_Z$ 状态，电容又在 $+U_Z$ 的作用下开始充电，完成一个周期的充放电过程，并在此后周而复始地重复这一过程，产生了稳定的矩形波输出。电路输出电压 u_o 与电容两端电压 u_C 的波形如图 2-7-2 (b) 所示，由于电容充放电时间常数相同，故输出波形高电平与低电平时间相等，是一个方波。

利用电路的一阶 RC 充放电规律可以得到：

方波的周期为：

$$T = 2RC \ln\left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right)$$

波形的频率为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2RC \ln\left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right)}$$

3. 占空比可调的矩形波产生电路

图 2-7-3 所示为占空比可调的矩形波产生电路原理图，其工作原理如下：

- (1) 当 $u_o = +U_Z$ 时，二极管 D_1 导通， D_2 截止，电容 C 充电，充电回路为： $u_o \rightarrow R_{W1} \rightarrow D_1 \rightarrow R \rightarrow C \rightarrow$ 地；电容 C 充电的时间常数为： $\tau_1 = (R_{W1} + R_{D1} + R)C$
- (2) 当 $u_o = -U_Z$ 时，二极管 D_2 导通， D_1 截止，电容 C 放电，放电回路为：地 $\rightarrow C \rightarrow R \rightarrow D_2 \rightarrow R_{W2} \rightarrow u_o$ ，电容 C 放电的时间常数为： $\tau_2 = (R_{W2} + R_{D2} + R)C$ 。

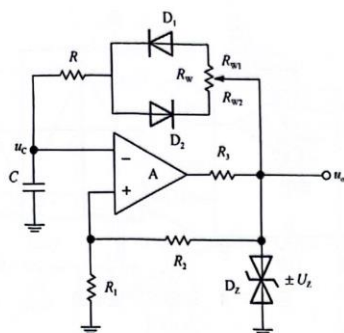


图 2-7-3 占空比可调的矩形波产生电路

三、预习思考

1. 如何调节振荡波形的频率？

思考：通过调节充电回路中的等效 R_{eq} C_{eq} 相关参数值来调节频率。

四、实验内容

1. 实验要求

以运放 $\mu A741$ 为核心构成的方波产生电路如图 2-7-5 所示，稳压管可以选择稳定电压在 4~8V 左右的型号，如 1N4730~1N4738 等。

由实验原理分析可知，该电路输出的方波峰峰值由输出的稳压二极管 D_1 、 D_2 稳压值确定，可变电阻 R_W 可以改变输出方波的周期。

由式

$$T = 2RC \ln(1 + 2 \frac{R_1}{R_2})$$

可知，当 $R_1 = R_2 = 10k\Omega$ 时，可得方波的周期为 $T=2.2RC$ ，其中 R 为 R_0 与 R_W 左边部分电阻的串联，随着 R_W 的调整，输出方波的周期应该在 2.2ms 到 24.2ms 之间变化。

2. 仿真实验

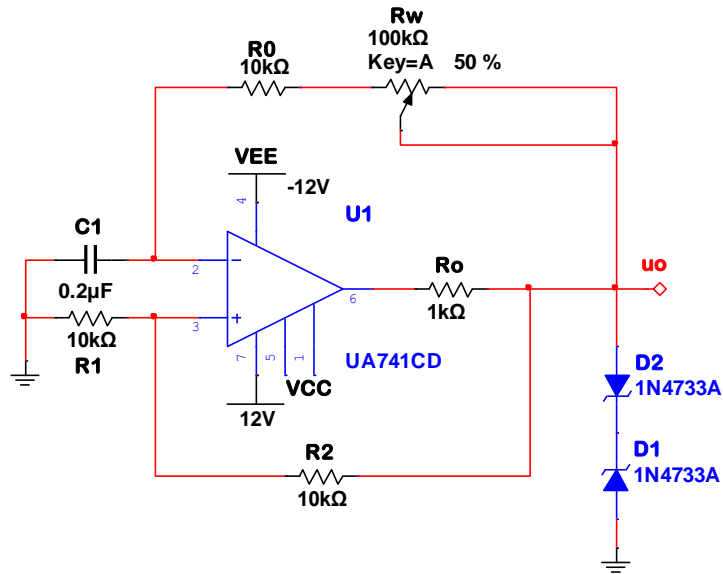
利用 Multisim 软件，通过添加元器件、连线等操作，把电路先连接好，选择电源电压为+12V。

(1) 观察波形并测量参数

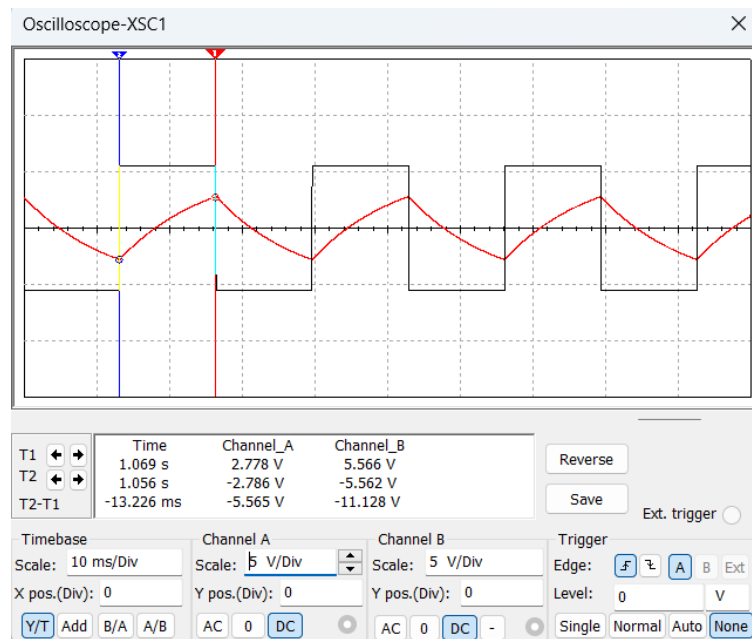
仿真实验波形如图 2-7-6 所示，利用双通道示波器分别观察输出波形与电容 C 的充放电波形，测量输出方波的幅度、电容两端电压的变化规律以及翻转点电压值，测量输出周期与可变电阻 R_W 的变化规律。

注意：仿真运行开始时没有波形输出，需要等待一段时间后才能正常，尤其是周期比较大的时候。

电路原理图如下。



对 u_o 、 u_c 的仿真结果如下：



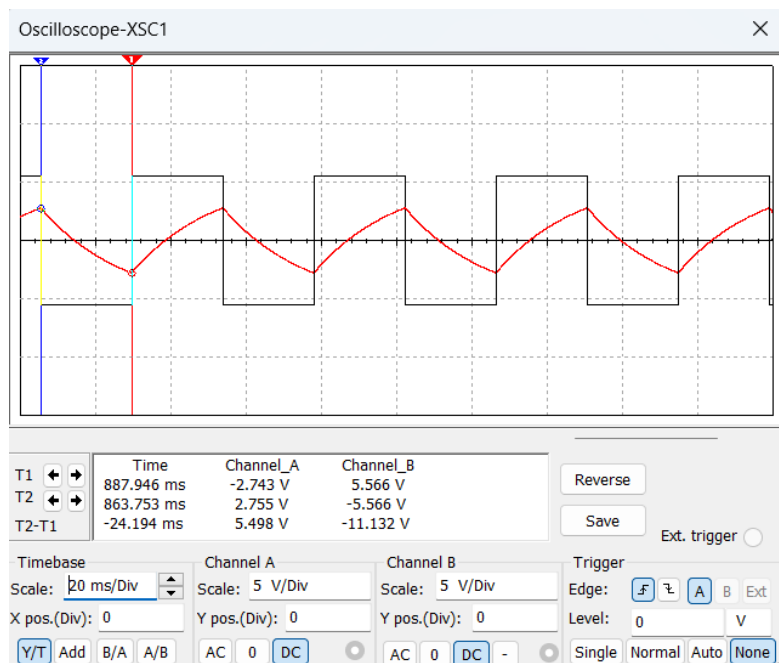
可以得到以下几个结论。

1. u_o 的高低电平数值为 5.566V、-5.562V，这是稳压管的稳压数值。
2. u_c 的跳变点电压为 2.778V、-2.786V，约为 u_o 的一半。这是因为运放共模端两个10kΩ

电阻分压，振荡器门限电压为 $\pm \frac{u_o}{2}$ 。

3. 周期长度为 $T=26\text{ms}=2.2RC$ 。

增大 R_w 至100kΩ：



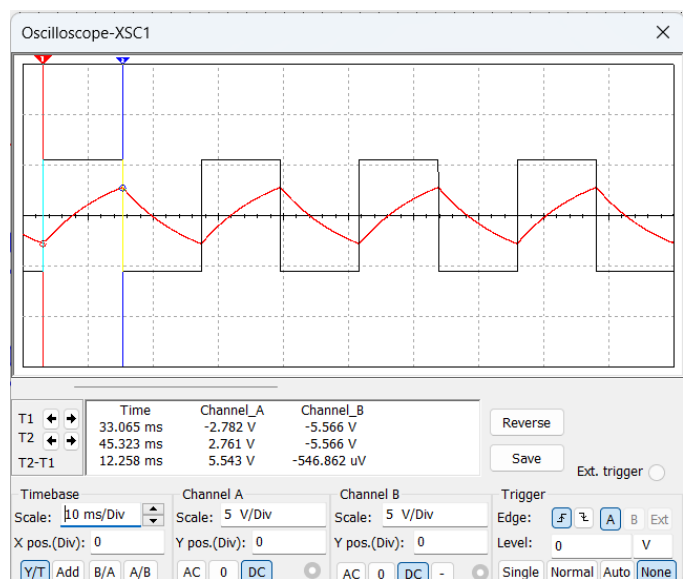
观察可得：周期变为 $24.194\text{ms} \approx 2.2RC = 2.2 \times 110k \times 0.2\mu$ ，电压数值不变。

由仿真波形图 2-7-6 可以看出，输出的方波周期随着可变电阻的变化而变化，且与理论分析基本一致：当可变电阻为 0Ω 时，输出波形的周期约为 2.277ms ，当可变电阻为 $100k\Omega$ 时，输出方波的周期为 24.257ms 。输出方波的幅度由选用的稳压二极管确定，而电容充放电变化规律的翻转点也正好是输出幅度的一半，与理论分析也基本一致。

(2) 电容值的变化对波形的影响

由理论分析可知，输出方波的周期与电容的充放电时间常数成正比，实验（1）说明了改变电阻，输出波形的周期随可变电阻的变化规律，如果将电容 C 由原来的 $0.1\mu\text{F}$ 加大到 $0.2\mu\text{F}$ ，输出方波的周期会发生如何变化呢？图 2-7-7（a）（b）所示分别为 $C=0.2\mu\text{F}$ ，可变电阻为 0Ω 和 $100k\Omega$ 时的输出波形，方波的周期分别为 4.480ms 和 48.327ms ，与电容为 $0.1\mu\text{F}$ 时对应的输出方波周期满足两倍的关系。

改变 C 为 $0.1\mu\text{F}$ ：



观察可得：周期变为 $12.258\text{ms} \approx 24.194/2$ ，电压数值不变。这与理论分析是相符的（ $\tau = RC$ ，周期与 C 恰成正比例关系）。

(3) 翻转点电压对波形的影响

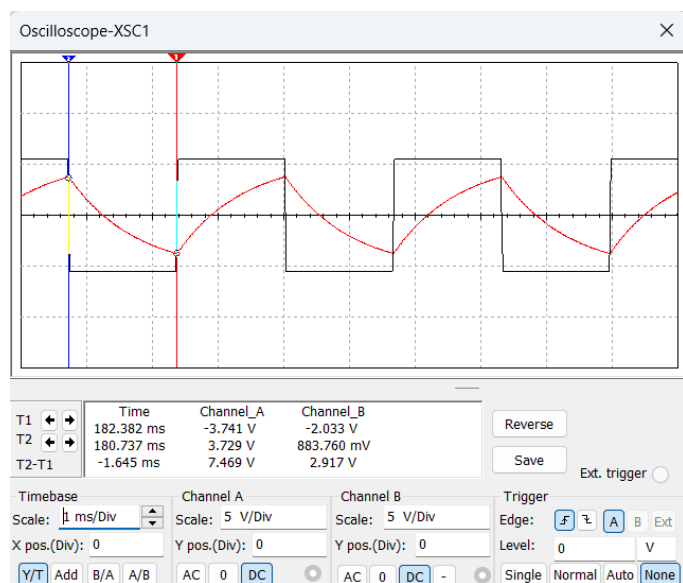
通过改变电阻 R_1 或 R_2 的阻值，运行仿真软件后观察输出波形，进一步验证方波产生电路的输出波形与电路参数的关系，加对方波产生电路的理解。

电容用 $0.1\mu\text{F}$ ，可变电阻统一调整到 0Ω ，分别设置电阻在 $R_1 = 10\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 5\text{k}\Omega$ 及 $R_1 = 5\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 10\text{k}\Omega$ 两种情况下，测量方波和电容两端的波形，如图 2-7-8 所示。

由图 2-7-8 (a) 可知，由于翻转点电压值升高，导致输出波形的周期也变大，测量出周期为 3.290ms ；图 2-7-8 (b) 表示了翻转点电压变低，方波的周期也相应变小，仿真测量周期为 1.468ms ，与理论分析对应的规律一致。

由图 2-7-8 (b) 也可以看出，当翻转点电压值比较低时，电容两端的充放电波形近似为线性规律，在要求不高的场合，也可以把电容两端的波形当作三角波使用。

$R_1 = 10\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 5\text{k}\Omega$ ：



$R_1 = 5\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 10\text{k}\Omega$ ：



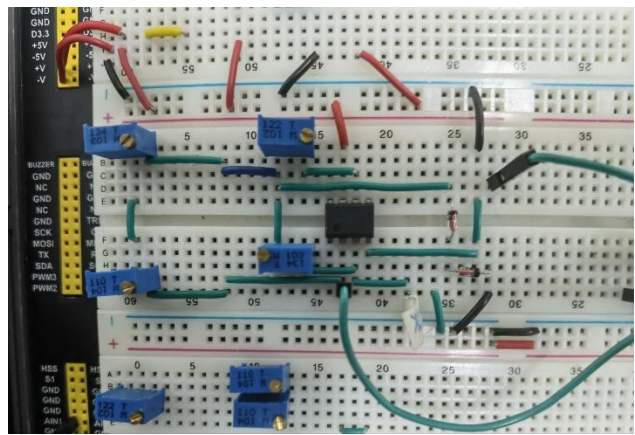
3. 电路实验

按图 2-7-5 接好电路，确认连接无误后打开电源开始实验，记录波形和数据。

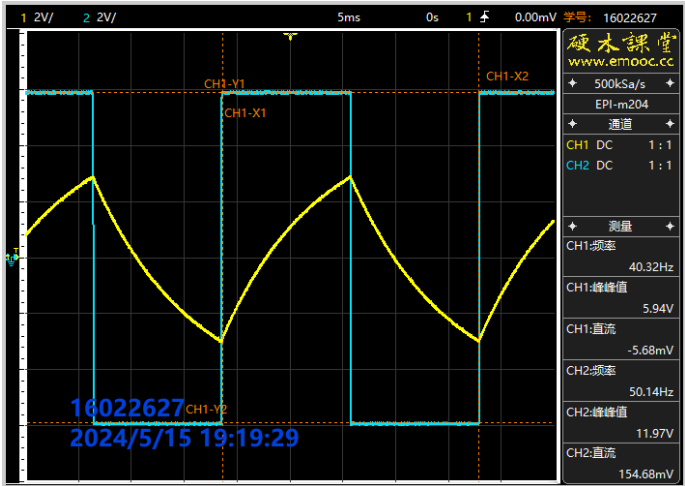
(1) 示波器测量波形及参数

利用双通道示波器，一个通道固定接输出端，另外一个通道分别测量电容电压、运放的同相端对地电压，当可变电阻 R_W 从一端调整到另一端时，记录相应的波形和参数于表 2-7-1 中，标记出每个波形的电压、时间等相关信息，并与理论计算值分析比较。

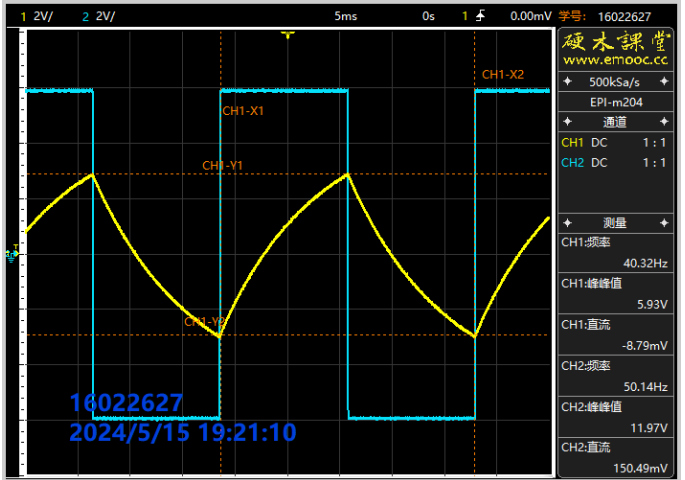
电路搭接如下。



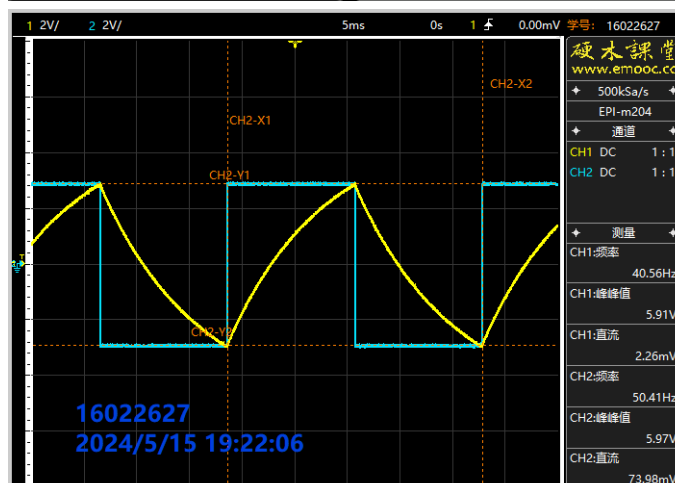
$R_W = 100k\Omega$: (从上至下分别为 u_o 、 u_C 、 u_+)



CH2-X1 : -6.35ms	CH2-Y1 : 5.93V
CH2-X2 : 17.87ms	CH2-Y2 : -5.93V
ΔX: 24.22ms	ΔY: -11.82V

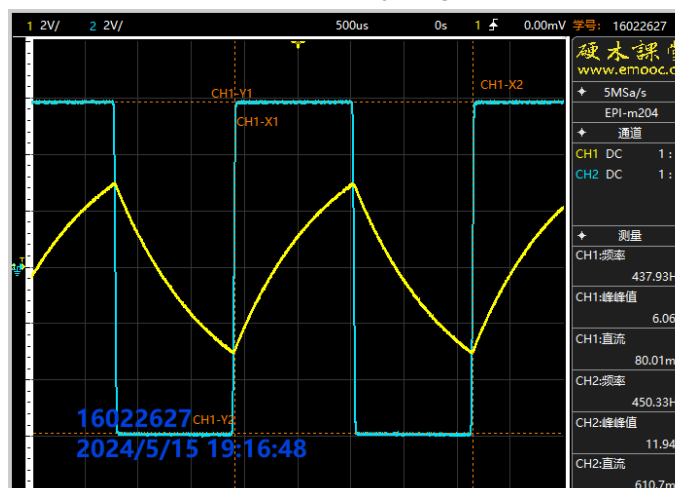


CH1-X1 : -6.35ms	CH1-Y1 : 2.89V
CH1-X2 : 17.87ms	CH1-Y2 : -2.92V
ΔX : 24.22ms	ΔY : -5.81V

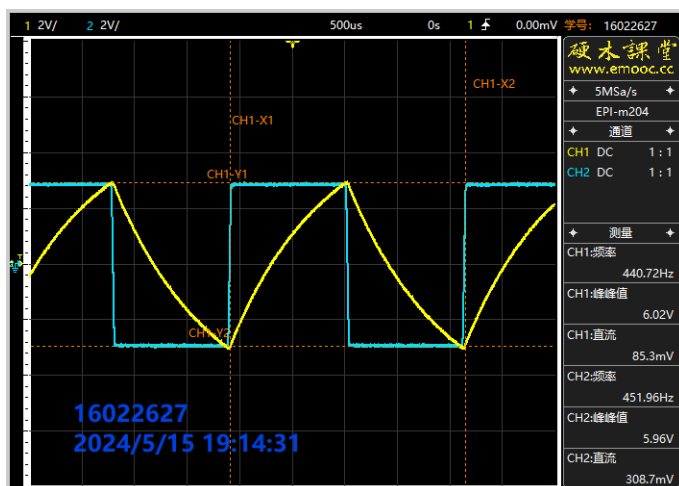


CH2-X1 : -6.35ms	CH2-Y1 : 2.92V
CH2-X2 : 17.87ms	CH2-Y2 : -2.92V
ΔX : 24.22ms	ΔY : -5.81V

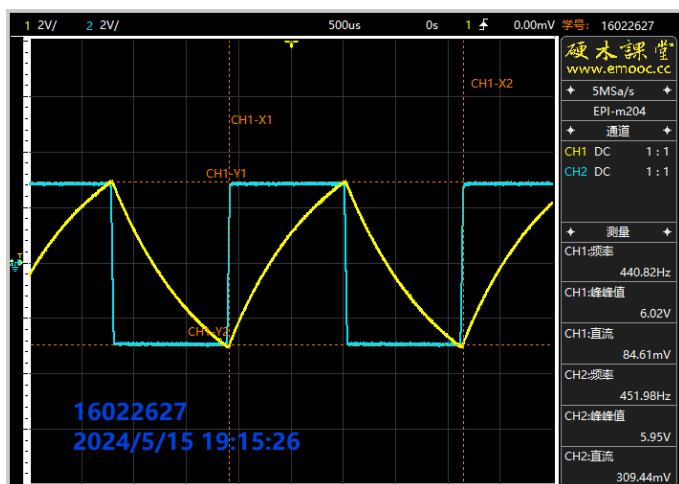
$R_W = 0\Omega$: (从上至下分别为 u_o 、 u_c 、 u_+)



CH1-X1 : -589.58us	CH1-Y1 : 5.86V
CH1-X2 : 1.65ms	CH1-Y2 : -5.89V
ΔX : 2.24ms	ΔY : -11.75V



CH1-X1 : -589.58us	CH1-Y1 : 2.92V
CH1-X2 : 1.65ms	CH1-Y2 : -2.95V
ΔX : 2.24ms	ΔY : -5.87V

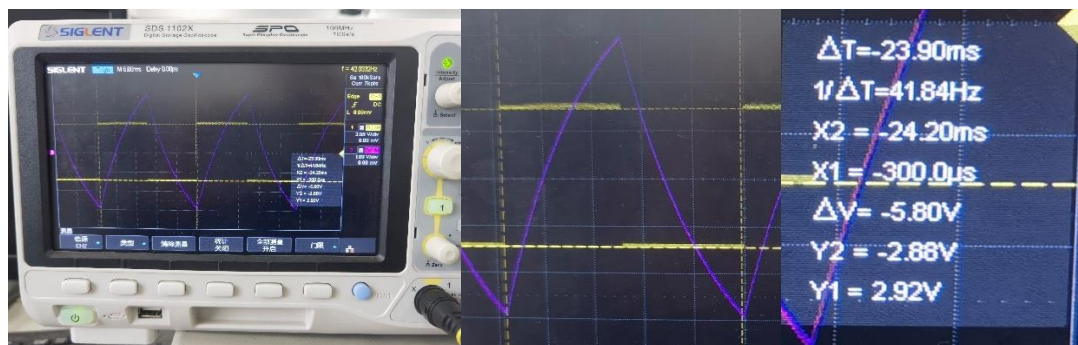
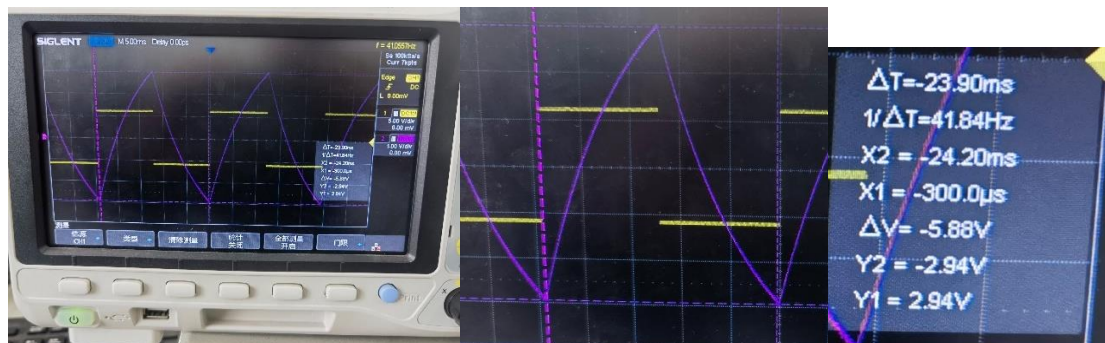
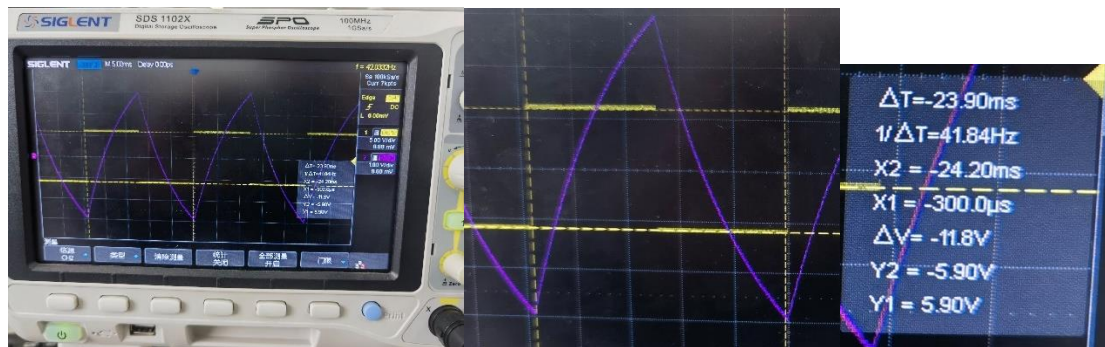


CH1-X1 : -589.58us	CH1-Y1 : 2.94V
CH1-X2 : 1.65ms	CH1-Y2 : -2.94V
ΔX : 2.24ms	ΔY : -5.87V

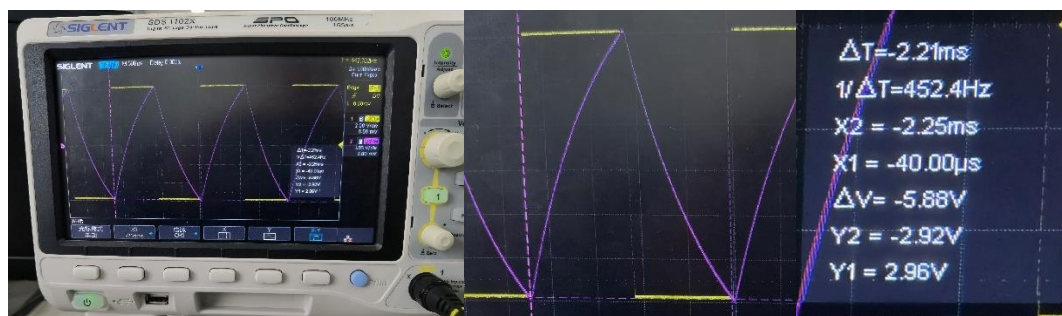
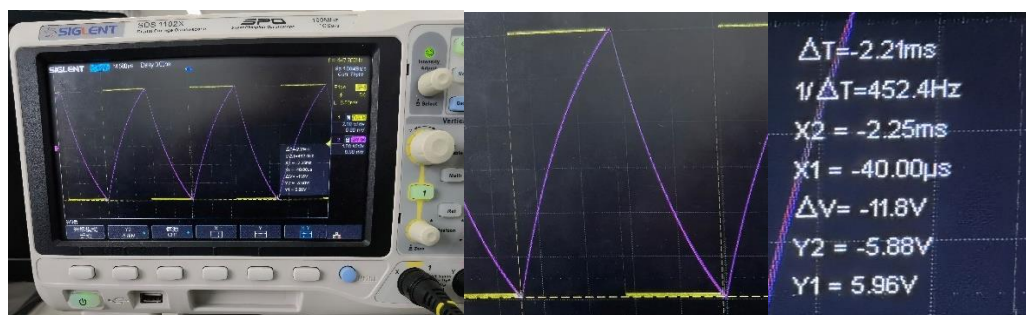
易派测量数据		
	$R_W = 0\Omega$ 时的波形及参数	$R_W = 100k\Omega$ 时的波形及参数
u_o	11.75	11.82
u_c	5.87	5.81
u_+	5.87	5.81

实验室测量数据如下。

$R_W = 100k\Omega$: (从上至下分别为 u_o 、 u_c 、 u_+)



$R_W = 0\Omega$: (从上至下分别为 u_o 、 u_C 、 u_+)





实验室测量数据		
	$R_W = 0\Omega$ 时的波形及参数	$R_W = 100k\Omega$ 时的波形及参数
u_o	11.8	11.8
u_C	5.88	5.88
u_+	5.80	5.80

该部分对应的理论值

理论值		
	$R_W = 0\Omega$ 时的波形及参数	$R_W = 100k\Omega$ 时的波形及参数
u_o	$2U_Z = 11.6V$	$2U_Z = 11.6V$
u_C	$U_Z = 5.8V$	$U_Z = 5.8V$
u_+	$U_Z = 5.8V$	$U_Z = 5.8V$

其中，对**输出端的稳压数据**进行说明。同上一实验，本实验中采用的稳压管稳压数值 U_Z 为 5.1V，取其导通压降为 $U_D = 0.7V$ ，则输出端理论稳压数值

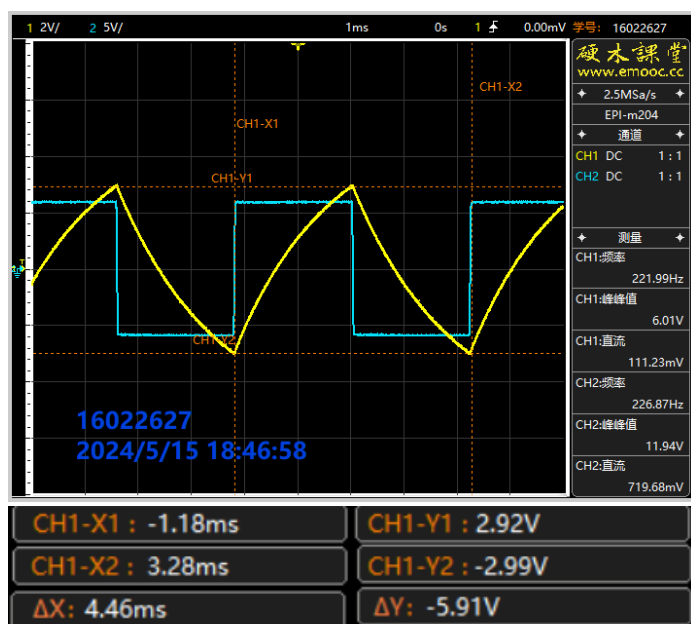
$$U_{OZ} = U_Z + U_D = 5.8V$$

对比理论值与实验值，数据符合理论分析。这部分实验说明，改变 R 来影响周期 T 的机理为：通过改变 R_W 的值来改变 R 的值，从而改变时间常数 τ ，直接影响周期。此时**跳变点对应的电压并未发生改变，而是直接改变了充放电的周期（波形）。**

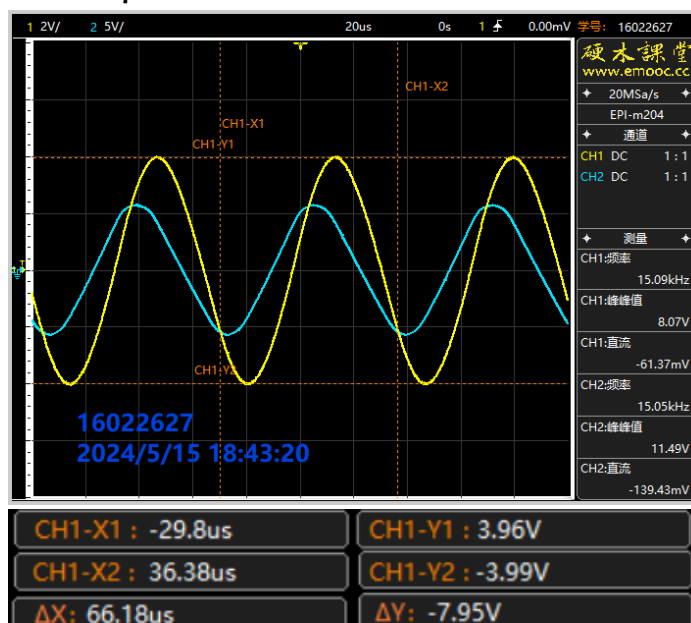
（2）调整电容值测量波形与参数的变化

将可变电阻 R_w 调整到 0Ω ，电容由原来的 $0.1\mu F$ 调整到 $0.2\mu F$ （可以在原来 $0.1\mu F$ 电容的边上并联一个 $0.1\mu F$ 电容），测量波形并记录参数。再将电容调整到 $0.01\mu F$ ，观测和记录参数于表 2-7-2 中，并与理论计算值分析对比。

$C = 0.2\mu F$ ：



$C = 0.01\mu F$:



易派测量数据		
$R_W = 0\Omega$, C 的取值为	$0.2\mu F$	$0.01\mu F$
输出波形的周期	4.46ms	132.36 μs
理论计算值	4.39ms	219.72 μs

可以发现，当电容取 $0.2\mu F$ 时，容值增大至原来的两倍，时间常数 τ 增大至原来的两倍，其达到同一电压（即**正负门限电压**）所需的时间也增大为原来的两倍，即**周期增大为原来的两倍**。对比数据： $4.46ms \approx 2.24ms \times 2$ ，大致符合两倍关系。

而当电容取 $0.01\mu F$ 时，容值偏小，时间常数 τ 偏小，充电较快。因而，由于运放实际输出电压具有一定压摆率，其电压在两状态转换点之间并未完成建立，呈现示波器显示的类三角波波形。（从上次实验可以知道，本运放的压摆率约为 $30\mu s$ ，一上一下则为 $60\mu s$ ，与周期近似相符）受此影响，电容实际输出波形为类似正弦波的波形。（**经过实验室测量，此波形可能不可靠**）

精确计算

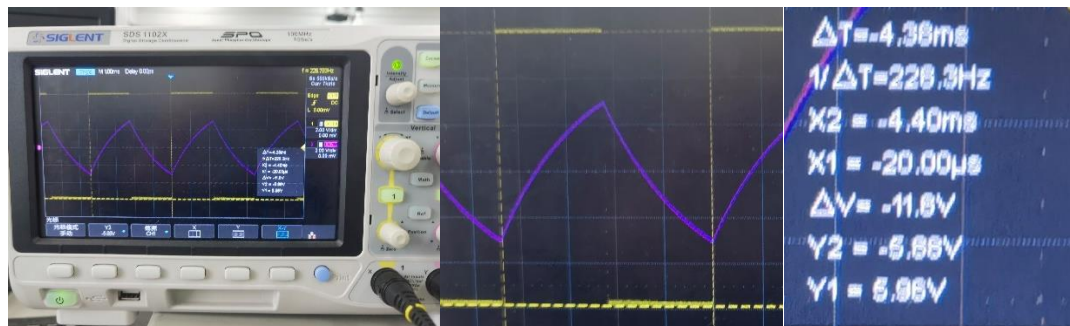
除了与原电路数据对比，还可以直接进行计算得到理论值：

$$T_{0.2\mu F} = 2 \times 10k\Omega \times 0.2\mu F \times \ln 3 = 4.39ms$$

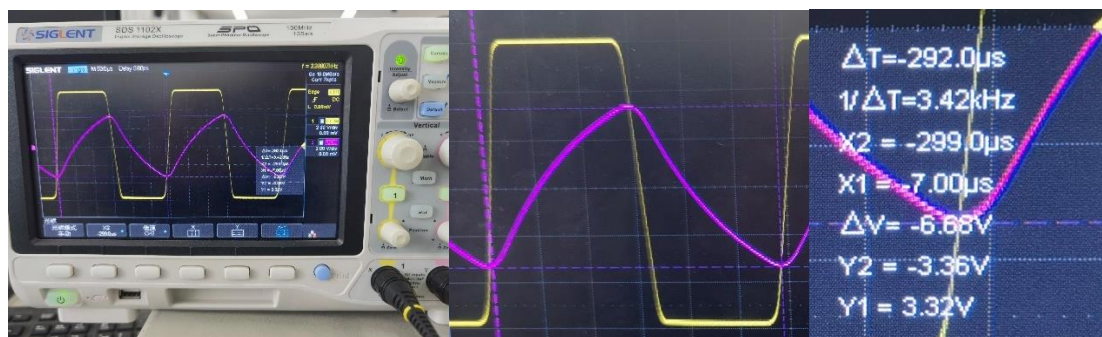
$$T_{0.01\mu F} = 2 \times 10k\Omega \times 0.01\mu F \times \ln 3 = 219.72\mu s$$

实验室测量数据如下。

$C = 0.2\mu F$ ：



$C = 0.01\mu F$ ：



由于 $292\mu s$ 与理论值差距较大，多次测量并精确电阻值后确认此数据无误，现对此数据进行分析。

由于电容充放电电压是由输出电平提供的，观察输出波形可发现，实际输出波形会由于运放**压摆率**的存在而存在一段**线性区**。我们可以对线性区产生的影响作近似处理：其相对于 $U=0V$ 对称，视其对电容的充放电影响正负面积相抵消。即：**线性区电容近似不充电也不放电**。

按此近似分析，则输出波形的实际周期 T ，应为电容充放电的时间 T_C ，与两段线性区延时 T_{linear} 的时间之和。即

$$T = T_C + 2T_{linear}$$

取 T_C 为理论值 $220\mu s$ 、 T_{linear} 为上次实验压摆率数据 $30\mu s$ ，则近似模型得出的周期

$$T = 280\mu s$$

与实测结果相差不大（相对误差 $\Delta_r = 4.29\%$ ，模型可靠）。

该模型推测可以**用电压极值来佐证**。观察到实验中电容的电压极值实际为

$$\begin{cases} U_M = 3.32V \\ U_L = 3.36V \end{cases}$$

是高/低于 $U_{th} = \frac{U_Z}{2}$ 的。这说明，实际在越过阈值电压 U_{th} 后，**输出电压并未第一时间跳变**，

此时给电容充/放电的仍是原电平，电容继续向极性方向增长，**直到输出电压压摆至0**。利用游标竖线的标示可以看出，电容波形达到负向最大时，其对应的输出波形近似处于零点。上述推测得到佐证。

实验室测量数据

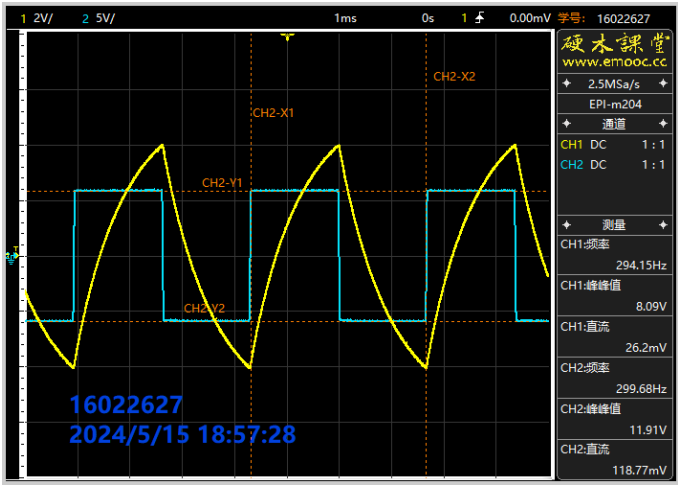
$R_W = 0\Omega$, C 的取值为	$0.2\mu F$	$0.01\mu F$
输出波形的周期	4.36ms	292.0 μs
理论计算值	4.39ms	219.72 μs

$C = 0.2\mu F$ 的实验室数据结果与易派测量及理论推算差异不大，能够佐证理论分析。这部分实验说明，改变 C 来影响周期 T 的机理为：通过改变 C 的值来改变时间常数 τ ，直接影响周期。此时跳变点对应的电压并未发生改变，而是直接改变了充放电的周期（波形）。

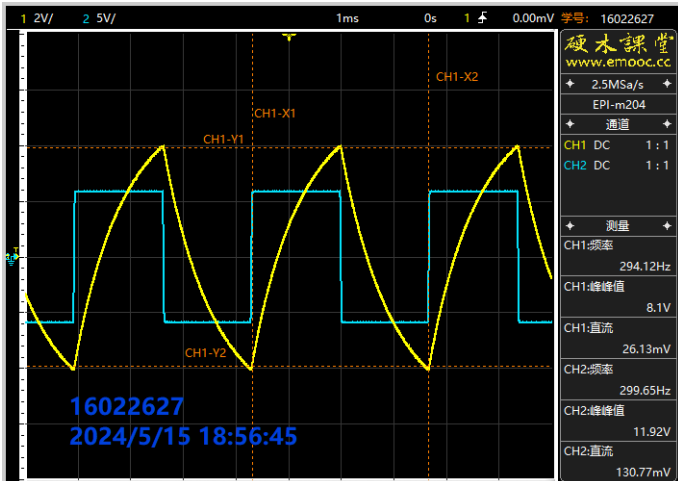
（3）同相端电压值对波形的影响

可变电阻 R_W 调整为 0Ω ，电容恢复到 $0.1\mu F$ ，改变输出到同相端之间的分压关系，使电容充放电的翻转点电压发生变化，测量相关点处的波形与参数，记录于表 2-7-3 中，并与理论计算值分析对比。

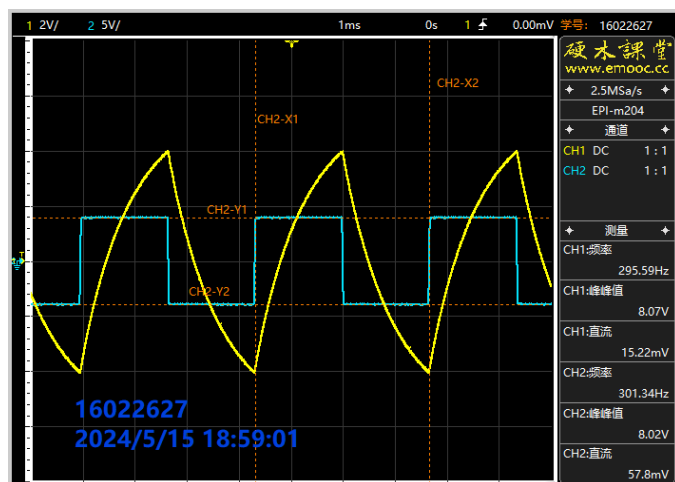
$R_1 = 10k\Omega$ 、 $R_2 = 5k\Omega$ ：（从上至下分别为 u_o 、 u_C 、 u_+ ）



CH2-X1 : -685.56us	CH2-Y1 : 5.86V
CH2-X2 : 2.66ms	CH2-Y2 : -5.92V
ΔX: 3.35ms	ΔY: -11.75V

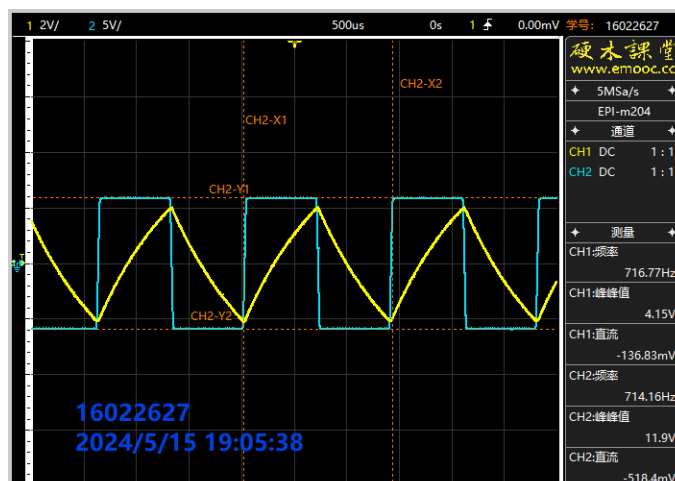


CH1-X1 : -685.56us	CH1-Y1 : 3.92V
CH1-X2 : 2.66ms	CH1-Y2 : -3.92V
ΔX: 3.35ms	ΔY: -7.84V

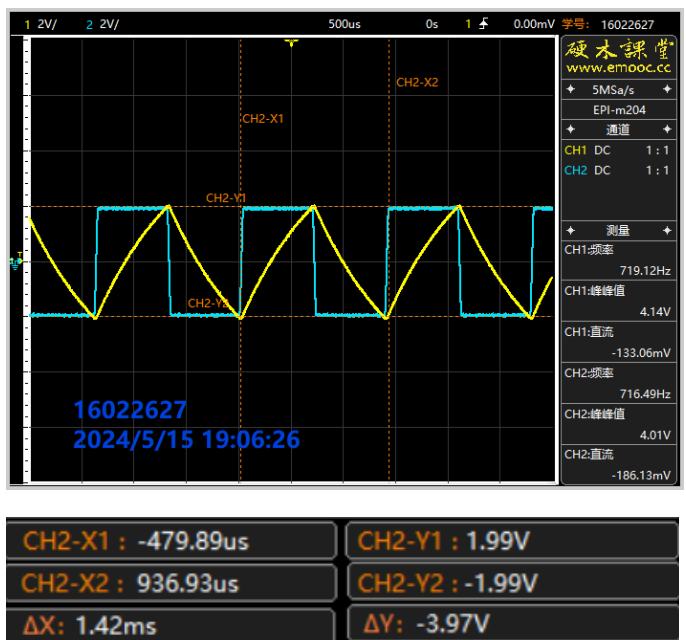
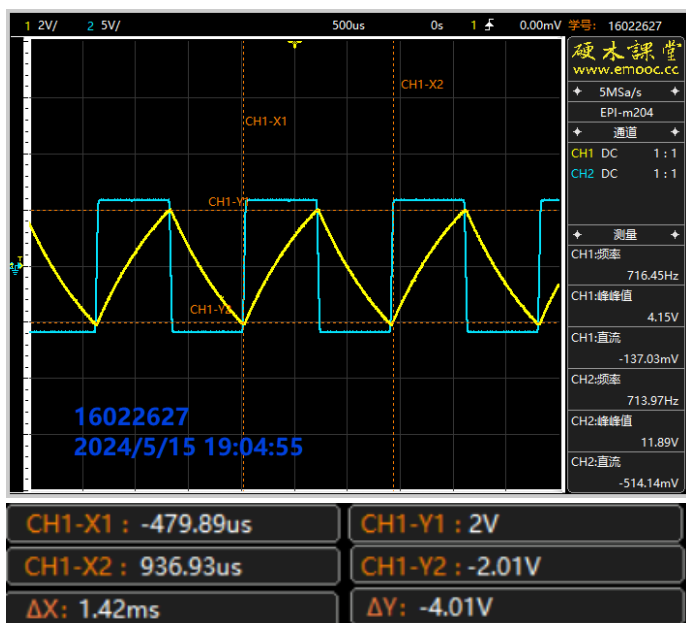


CH2-X1 : -685.56us	CH2-Y1 : 3.93V
CH2-X2 : 2.66ms	CH2-Y2 : -3.93V
ΔX: 3.35ms	ΔY: -7.86V

$R_1 = 5k\Omega$ 、 $R_2 = 10k\Omega$: (从上至下分别为 u_o 、 u_c 、 u_+)



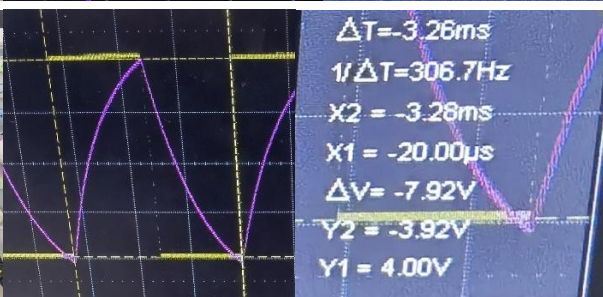
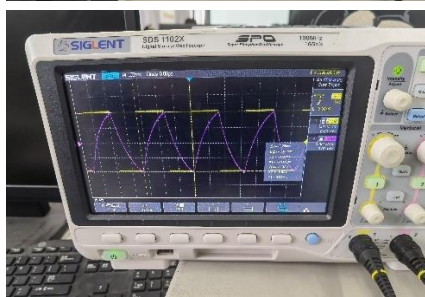
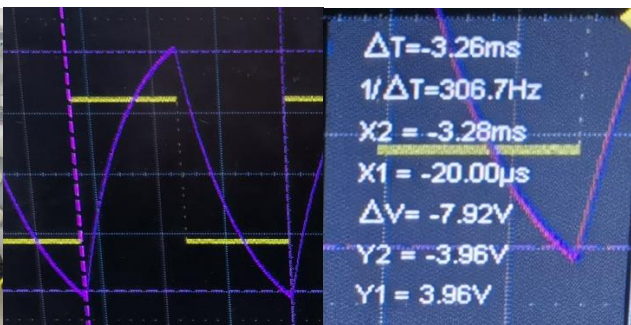
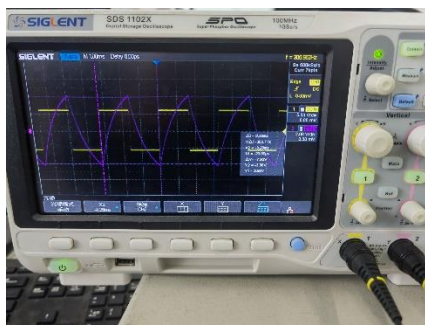
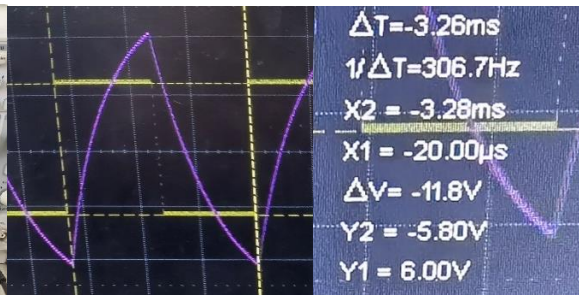
CH2-X1 : -479.89us	CH2-Y1 : 5.92V
CH2-X2 : 936.93us	CH2-Y2 : -5.92V
ΔX: 1.42ms	ΔY: -11.84V



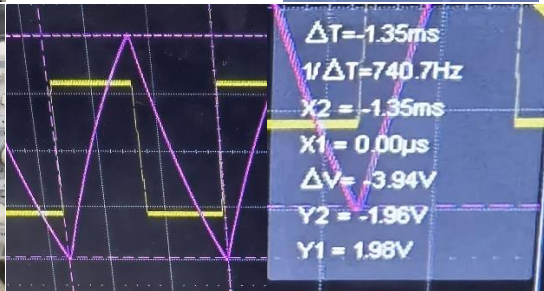
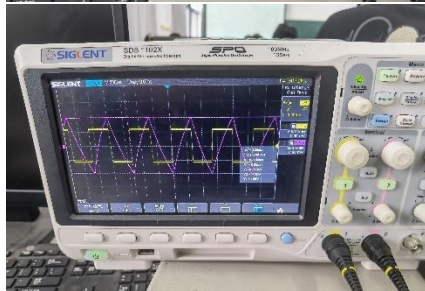
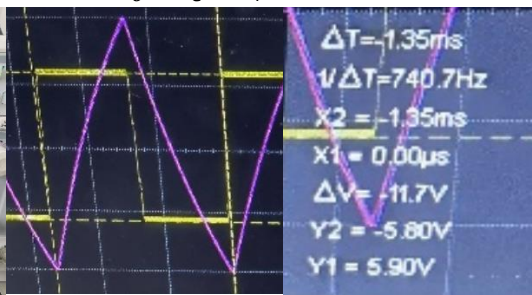
易派测量数据		
电阻取值	$R_1 = 10k\Omega, R_2 = 5k\Omega$	$R_1 = 5k\Omega, R_2 = 10k\Omega$
u_o/V	11.75	11.84
u_c/V	7.84	4.01
u_+/V	7.86	3.97
测量周期/ms	3.35	1.42
理论计算周期	3.22	1.39

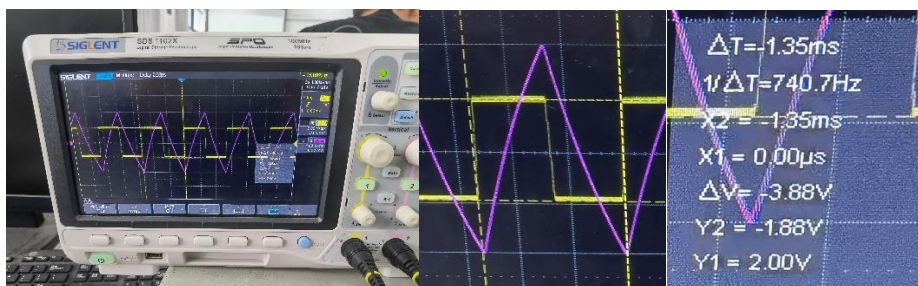
实验室测量数据如下。

$R_1 = 10k\Omega$ 、 $R_2 = 5k\Omega$: (从上至下分别为 u_o 、 u_c 、 u_+)



$R_1 = 5\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 10\text{k}\Omega$: (从上至下分别为 u_o 、 u_c 、 u_+)





理论计算

$$T_{R_1=10k\Omega, R_2=5k\Omega} = 2 \times 10k\Omega \times 0.1\mu F \times \ln 5 = 3.22ms$$

$$T_{R_1=5k\Omega, R_2=10k\Omega} = 2 \times 10k\Omega \times 0.1\mu F \times \ln 2 = 1.39ms$$

记输出端稳压数值为 U_Z ，则理论电压值（数值计算时取 6V）

$$u_o = 2U_Z = 12V$$

$$u_c = u_+ = 2U_Z \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \begin{cases} 8V & R_1 = 10k\Omega, R_2 = 5k\Omega \\ 4V & R_1 = 5k\Omega, R_2 = 10k\Omega \end{cases}$$

实验室测量数据		
电阻取值	$R_1 = 10k\Omega, R_2 = 5k\Omega$	$R_1 = 5k\Omega, R_2 = 10k\Omega$
u_o/V	11.8	11.7
u_c/V	7.92	3.94
u_+/V	7.92	3.88
测量周期/ms	3.26	1.35
理论计算周期	3.22	1.39

实验室数据结果与易派测量及理论推算差异不大，能够佐证理论分析。这部分实验说明，改变 R_1 、 R_2 来影响周期 T 的机理为：通过改变 R_1 、 R_2 的比例关系来改变阈值电压 U_{TH} 、 U_{TL} 。此时充放电的波形并未发生改变，只是跳变点对应的电压改变了，周期从而产生对应改变。

五、实验总结

本次实验我们进一步研究了波形发生器，主要是方波的实践。由于我最近在学习电赛相关知识，其实更感兴趣的是 PWM 波的产生，不过要完全探究其产生的控制涉及到微机的知识，那就太过复杂了，单是探讨其模电的产生又与方波发生器无异。